

madsage  
IRan Education  
Research  
NETwork  
(IRERNET)

شبکه آموزشی - پژوهشی مادیج  
با هدف بهبود پیشرفت علمی  
و دسترسی راحت به اطلاعات  
برای جامعه بزرگ علمی ایران  
ایجاد شده است



مادیج

شبکه آموزشی - پژوهشی ایران

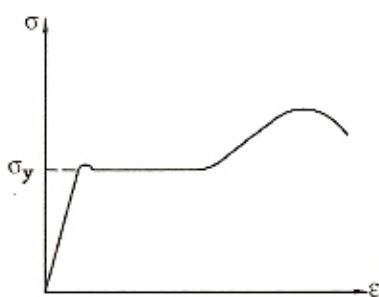
madsage.com  
مادیج

porta. Lorem ipsum  
dolor mauris e  
goma. Lorem ipsum.

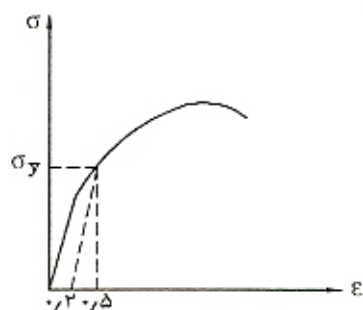
## فولاد و خواص آن

**تنش تسلیم (در فولادهای نرمه):** به تنشی اطلاق می‌شود که در اغلب فولادهای متعارف ساختمانی، مرزی معین بین عملکرد ارتجاعی و خمیری ترسیم می‌کند. (شکل ۱-۱ الف)

**تنش تسلیم (در فولادهای آلیاژی):** به تنشی اطلاق می‌شود که در آن تنش، کرنش فولاد تقریباً ۰/۵ درصد باشد یا به طور دقیقتر از کرنش ۰/۲ درصد به موازات قسمت ارتجاعی منحنی تنش-کرنش خطی رسم کرده، تنش نقطه تقاطع این خط و منحنی را تنش تسلیم ( $\sigma_y$ ) می‌نامیم. (شکل ۱-۱ ب)



(الف) تنش تسلیم در فولادهای نرمه



(ب) تنش تسلیم در فولادهای آلیاژی

شکل ۱-۱. تعیین تنش تسلیم

### ۱-۱ انواع فولاد

فولادهای کربنی، فولادهای پر مقاومت، فولادهای آلیاژی

#### ۱-۱-۱ فولادهای کربنی (ساده)

حاوی کربن (حداکثر ۱/۷ درصد) و سیلیس و منگنز.

انواع فولادهای کربنی: ۱- فولاد کم کربن (کمتر از ۰/۱۵ درصد کربن دارد).

۲- فولاد با کربن نسبتاً متوسط (با درصد کربن بین ۰/۱۵ تا ۰/۲۹ درصد)

۳- فولاد با کربن متوسط - فولاد اعلاء (با درصد کربنی بین ۰/۳ تا ۰/۵۹ درصد)

۴- فولاد با کربن بالا (با درصد کربنی بین ۰/۶ تا ۱/۷ درصد)

با بالا رفتن درصد کربن فولاد، تنش تسلیم (جاری شدن) فولاد بالا رفته، شکل پذیری آن تقلیل یافته جوش پذیری آن نقصان می یابد.

## ۲- ۱- ۱ فولادهای پر مقاومت (مقاوم)

تنش تسلیم آنها در محدوده  $۲۷۵۰ \frac{kg}{cm^2}$  الی  $۴۸۰۰ \frac{kg}{cm^2}$  قرار گرفته است. بالا رفتن مقاومت این

فولادها تنها با اضافه شدن آلیاژهایی نظیر: کرم، کلسیم، مس، منگنز، مولیبدن، نیکل، فسفر، وانادیم یا زیرکونیم صورت گرفته است و هیچ گونه عملیات حرارتی خاصی در تولید فولاد به عمل نیامده است.

## ۳- ۱- ۱ فولادهای آلیاژی

در این فولادها به منظور دستیابی به مقاومت بالای تسلیم ( $۵۵۰۰ \frac{kg}{cm^2}$  الی  $۷۶۰۰ \frac{kg}{cm^2}$ ) آنها را تحت

عملیات تبرید و باز پخت قرار می دهند. چون این فولادها دارای پله خمیری مشخصی نیستند، لذا تنش این نوع فولادها را در نقطه ای که نظیر نقطه کرنش تقریباً ۰/۵ درصد است، معین کرده و آن تنش را تنش تسلیم فولاد می نامند. (شکل (۱-۱) ب))

عملیات باز پخت فولاد سبب می شود که تا حد بسیار قابل توجهی چقرمگی (toughness) و شکل پذیری (ductility) فولاد بالا برود و از بروز ترک در فولاد در حین جوشکاری جلوگیری شود.

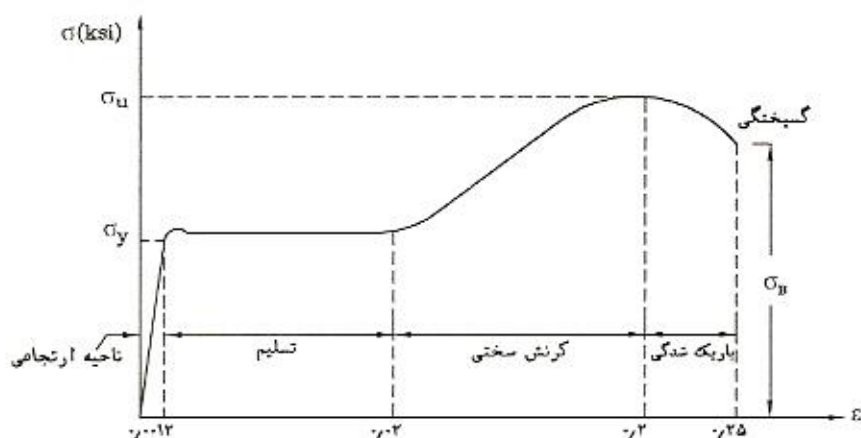
در جوش خود حفاظ قوس الکتریک (SMAW) الکترودها با علائم E70xx, E60xx و ... مشخص می شوند. حرف E به معنی الکترود (Electrod) بوده، دو رقم اول (۶۰، ۷۰ و ...) بیان کننده مقاومت کششی فولاد الکترود بر حسب ksi و دو رقم بعدی که با xx مشخص شده اند، بیان کننده گروه و وضعیت مصرفی الکترود است.

## ۲- ۱- ۲ متحنی تنش - کرنش فولاد در درجه حرارت محیط

همان طور که در شکل زیر ملاحظه می شود، هر گاه کرنش نمونه فولادی به ۱۵ الی ۲۰ برابر (در

اینجا ۱۷  $\approx \frac{0.2}{0.13}$  برابر) کرنش حد ارتجاعی برسد، بار دیگر فولاد در مقابل افزایش کرنش از خود سختی

نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، منحنی تنش - کرنش فولاد با شیبهی ملایم‌تر از شیبه قسمت ارتجاعی فولاد امتداد پیدا می‌کند. این ناحیه از منحنی را ناحیه سختی - کرنش (strain hardening) می‌گوییم.



شکل ۱-۲. منحنی تنش - کرنش فولاد در درجه حرارت محیط

نرمی فولاد: نرمی فولاد را می‌توان تغییر شکل غیرقابل برگشت فولاد دانست. اندازه‌گیری نرمی فولاد با تعیین درصد تغییر طول نمونه فولادی در هنگام گسیختگی نیز معین می‌شود.  
(در شکل بالا  $0.012 - 0.25 =$  اندازه نرمی)

ضریب ارتجاعی برشی (G): برای فولادهای ساختمانی در حدود  $10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \times 0.8$  است:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \Rightarrow \frac{E}{2} < G < \frac{E}{3}$$

### ۳-۱ عملکرد فولاد در درجه حرارت‌های بالا

وقتی که دمای فولاد از مرز  $95^\circ\text{C}$  می‌گذرد، کم‌کم منحنی تنش - کرنش فولاد شکل خطی خود را در ناحیه ارتجاعی از دست داده نقطه جاری شدن حذف می‌شود و E و  $\sigma_y$  و مقاومت کششی با افزایش دما رو به کاهش می‌گذارند.

فولادهایی که حدوداً درصد کربن بالایی دارند بین دمای  $150$  و  $370$  درجه سانتی‌گراد از خود، کهنگی کرنش (Strain aging) نشان می‌دهند. این نوع رفتار به معنی صعود نسبی تنش تسلیم و مقاومت کششی فولاد در حدود دماهای یاد شده می‌باشد. سایر تأثیرات دمای بالا بر روی فولاد به شرح زیر است:

الف - خزش برای بتن پدیده‌ای معلوم است، ولی برای فولاد در دمای محیط، خزشی ملاحظه نمی‌شود. اگر دمای فولاد بالا رود مقدار خزش آن نیز قابل توجه خواهد شد.



- ب - خاصیت شکنندگی فولاد به دلیل تغییر خاصیت متالورژیکی آن در بیش از  $510^{\circ}\text{C}$  افزایش می‌یابد.  
 ج - مقاومت در برابر اکسید شدن از  $540^{\circ}\text{C}$  به بالا، به شدت نقصان می‌یابد.

#### ۴-۱-۱ ترد شکنی

«یک نوع خرابی فاجعه انگیز است که بدون تغییر شکل اولیه خمیری (که می‌تواند خبر دهنده باشد) به سرعت اتفاق می‌افتد»  
 تردشکنی به عوامل زیر بستگی دارد:

##### ۴-۱-۱-۱ دما

هر قدر دما پایین تر رود، خطر تردشکنی افزایش خواهد یافت. همچنین در بالاتر از  $540^{\circ}\text{C}$ ، رسوب عناصر آلیازی فولاد سبب ایجاد ساختاری ترد می‌گردد.

##### ۴-۱-۲ ضخامت

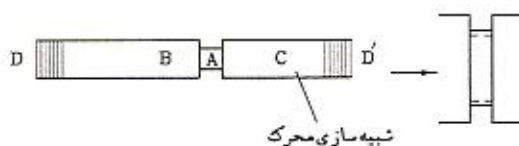
هر قدر فولاد ضخیم تر باشد، خطر ترد شکنی افزایش بیشتر خواهد یافت زیرا بدلیل اثر پواسون اثر بعد سوم ناچیز نمی‌شود و حالت تنش سه محوری رخ می‌دهد و تمایل تردشکنی فولاد افزایش می‌یابد.

##### ۴-۱-۳ حالت سه محوری تنش

عضوی که تحت تنش سه محوری قرار دارد، نسبت به عضوی که تحت تنش تک محوری قرار دارد، تردشکن تر است.

##### ۴-۱-۴ ترک و زخم و شکاف

وجود شکاف سبب می‌شود که از جاری شدن خمیری نمونه جلوگیری شده، نمونه ناگهان شکسته و گسیخته گردد. به شکل زیر دقت کنید.



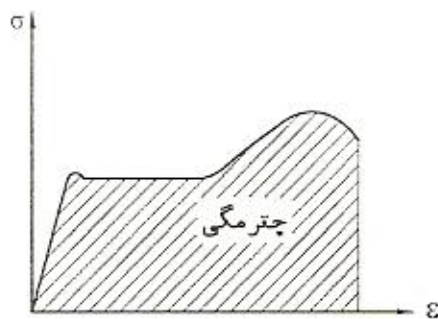
شکل ۱-۳. شیبه سازی ترک

## ۱-۵ چند تعریف

## ۱-۵-۱ چقرمگی

مقدار انرژی قابل جذب ارتجاعی و غیرارتجاعی توسط واحد حجم مصالح تا لحظه گسیختگی است.

اگر تنش تک محوری باشد، مقدار چقرمگی را می‌توان با سطح زیر منحنی تنش - کرنش معین کرد.



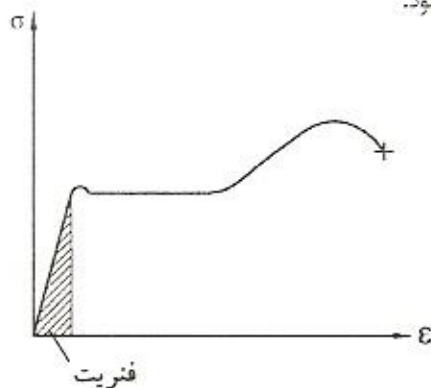
شکل ۱-۴. چقرمگی

## ۱-۵-۲ فنریت

نشان دهنده قدرت جذب انرژی ارتجاعی مصالح است. ضریب فنریت، مقدار انرژی ارتجاعی قابل

جذب توسط واحد حجم مصالح را می‌رساند که مقدار آن برای فولاد با سطح زیر منحنی تنش - کرنش تا

شروع نقطه خمیری معین می‌شود.



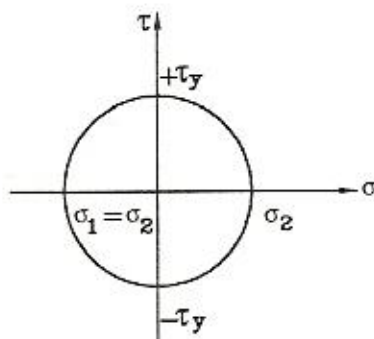
شکل ۱-۵. تعریف فنریت

۱-۵-۳ تنش تسلیم برشی ( $\tau_y$ )

ثابت می‌شود که تنش تسلیم برشی فولاد برابر با  $\frac{\sigma_y}{\sqrt{3}}$  می‌باشد.

اثبات: در شکل (۱-۶) دایره موهر مربوط به حالتی که تنش برشی خالص وجود داشته باشد، نمایش داده

( ۶ )



شکل ۱-۶. دایره موهر

شده است.

اما مطابق تئوری گسیختگی انرژی اعوجاج (هوبر، فن مایرز، هتکی)، در حالت دو بعدی داریم:

$$\sigma_y^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2 \Rightarrow \sigma_y^2 = \sigma_1^2 + (-\sigma_1)^2 - \sigma_1 (-\sigma_1) = 3\sigma_1^2 \Rightarrow \sigma_1 = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}}$$

در نتیجه مطابق دایره موهر داریم:

$$\tau_y = \sigma_1 = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}}$$
۴-۵-۱ نسبت پواسون ( $\mu$ )

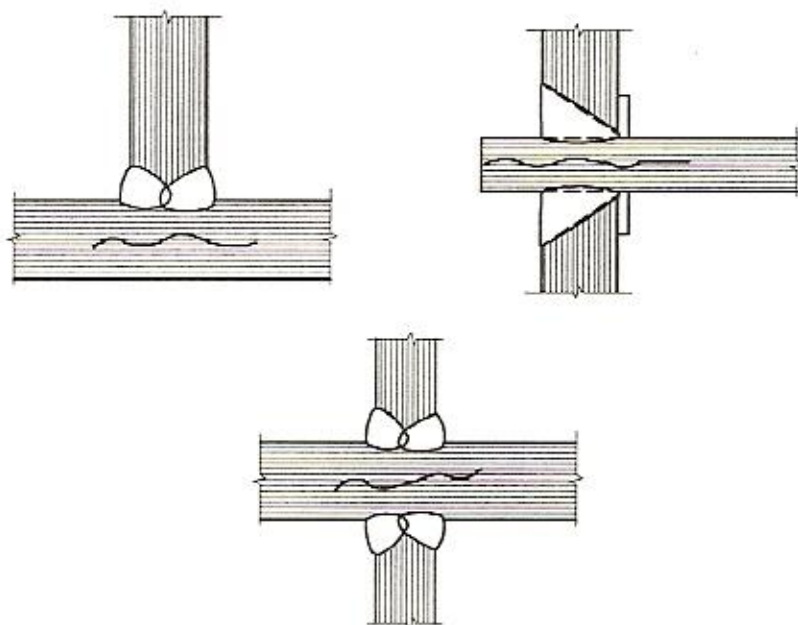
برای فولادهای ساختمانی مقدار نسبت پواسون در حوزه ارتجاعی  $0/3$  و در حوزه خمیری  $0/5$  است. مقدار  $0/5$  برای حالتی است که فولاد بدون افزایش نیرو، تغییر شکل (و نه تغییر حجم) پیدا می‌کند. در شکل (۱-۳)، وقتی میله  $DD'$  تحت کشش واقع می‌شود، بدون اینکه B و C حتی به جاری شدن برسند (در حالت کلی: بدون اینکه B و C به گسیختگی برسند)، تکه A به مرحله باریک شدگی می‌رسد و گسیخته می‌شود. پس میله  $DD'$  پس از یک تغییر شکل کوچک (ونه در حد  $\epsilon = 0/25$ ) به مرحله گسیختگی می‌رسد که این همان ترد شکنی است.

## ۶-۱ بارهای جنبشی (دینامیک)

هر قدر بارهای خارجی سریعتر وارد شوند، خطر ترد شکنی بیشتر خواهد بود.

## ۷-۱ پارگی لایه‌ای

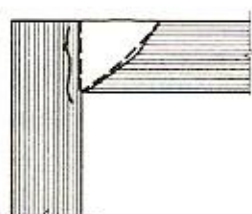
نوعی ترد شکنی است که در فولاد مینا و در محل‌های جوش اتفاق می‌افتد. به سبب انقباض شدید فلز جوش، فولاد مینا در بعد ضخامت خود در سطحی موازی دو سطح خارجی، ترک لایه‌ای بر می‌دارد.



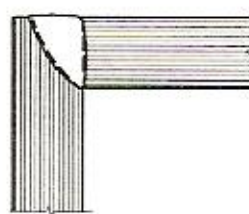
شکل ۷-۱. نمایش پارگی لایه‌ای در چند اتصال جوشی

البته یکی از عوامل تقویت پارگی لایه‌ای این است که خاصیت شکل‌پذیری فولاد، (قدرت تحمل کرنش) در جهت ضخامت به مراتب کمتر از خاصیت شکل‌پذیری فولاد، در جهت نورد آن است. حد ارتجاعی فولاد ( $\sigma_y$ ) نیز در جهت عرضی، کمی پایین‌تر از حد ارتجاعی آن در جهت نورد است.

همان‌طور که قبلاً گفته شد، انقباض جوش در جهت ضخامت قطعه فولادی موجب پارگی لایه‌ای می‌شود، لذا طرح جوش اتصال باید به نحوی باشد که انقباض جوش در جهت نورد قطعه عمل کند.

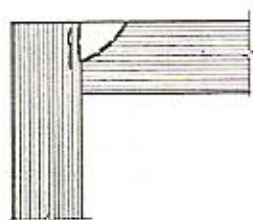


طرح مشکوک

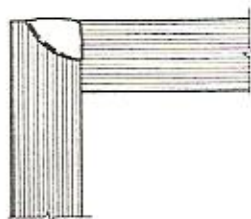


طرح مناسب



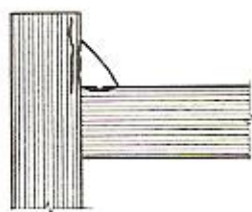


طرح مشکوی

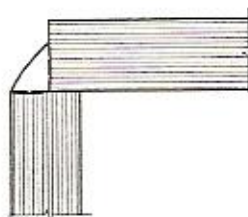


طرح مناسب

(ب)



طرح مشکوی



طرح مناسب

(ج)

شکل ۱-۸. امکان ایجاد پارگی لایه‌ای را می‌توان با طرحی مناسب کاهش داد.

## ۱-۸ استحکام خستگی

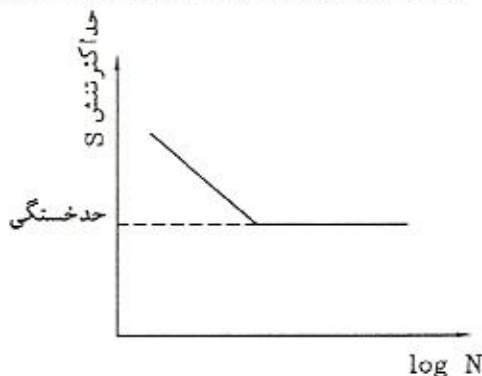
تکرار عمل بارگذاری و حذف بار، اگر به دفعات قابل توجهی انجام گیرد، حتی اگر تنش کمتر از تنش تسلیم ایجاد کند، ممکن است نهایتاً به گسیختگی قطعه بیانجامد. یک چنین پدیده‌ای به نام خستگی شناخته می‌شود.

هر چه فولاد نرمتر باشد، مقاومت بیشتری در برابر خستگی خواهد کرد.  
به وجود آمدن تنش چند محوری، از مقاومت در برابر خستگی خواهد کاست.

**حد خستگی (fatigue limit):** تنش است که در تعداد دوره تناوب بسیار زیاد (بیش از حدود دو میلیون) باعث گسیختگی می‌شود. (شکل ۱-۹)

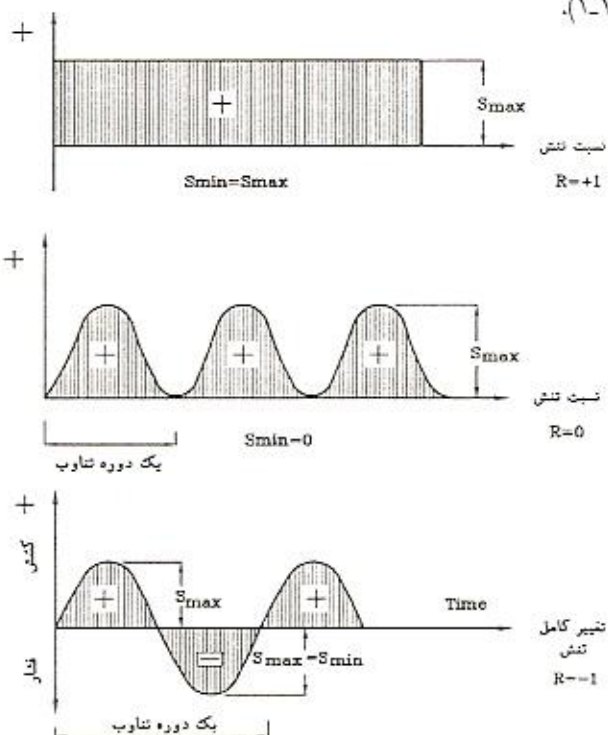
در مورد ساختمانهای فولادی چون تعداد دوره تناوب در عمر سازه یکصد هزار یا کمتر می‌باشد، تقلیل مقاومت فولاد ناچیز خواهد بود ولی در پلهای بزرگراهها انتظار می‌رود که تعداد دوره تناوب بارگذاری در عمر

سازه بیش از یکصد هزار باشد و بدین سبب در این سازه‌ها خستگی، مسأله مهمی خواهد بود.



شکل ۹-۱. منحنی تغییرات متداول S - N در مقایس لگاریتمی

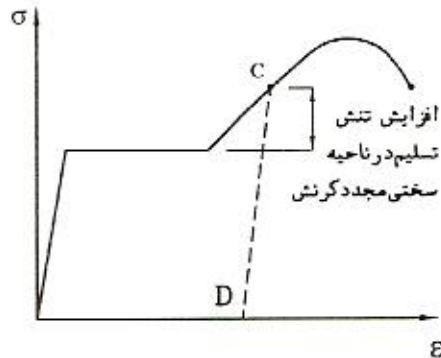
زمانی که نسبت تنش (یعنی R) بین  $\frac{1}{3}$  و  $1+$  است، خستگی نقشی بازی نمی‌کند، به عبارت دیگر تا زمانی که تنش حداقل، کمتر از  $\frac{1}{3}$  تنش حداکثر نباشد به شرطی که از نوع تنش حداکثر نیز باشد، خستگی نقشی ندارد (شکل ۱۰-۱).



شکل ۱۰-۱. انواع تغییرات متناوب تنش برای نسبت‌های مختلف تنش از  $R = -1$  الی  $R = +1$

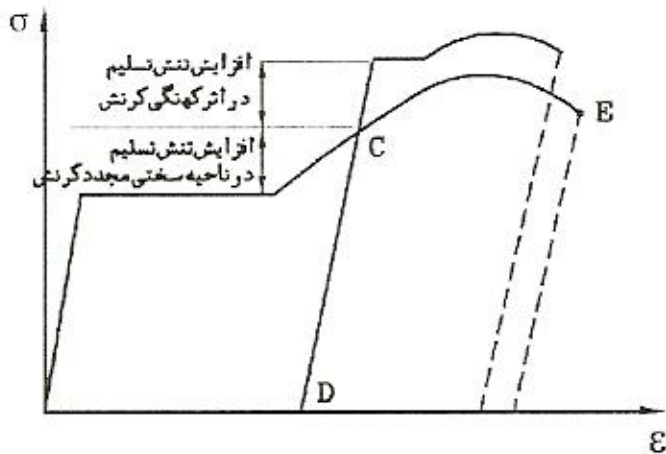
## ۹-۱ کار سرد و سخت گردانی کرنشی

در شکل (۱-۱۱) نمونه را تا نقطه C تحت بار قرار می‌دهیم و در این نقطه بار را از روی آن حذف می‌کنیم. در برگشت به حالت بدون بار، منحنی طول خط بریده CD را طی کرده، مبدأ بارگذاری مجدد نمونه نقطه D می‌شود. دیده می‌شود که طول خط CD بلندتر شده و به عبارت دیگر، تنش تسلیم فولاد نمونه جدید افزایش یافته است، یک چنین تغییر حالت فولاد به دلیل قطع بارگذاری در ناحیه سخت گردانی کرنش فولاد است و در عوض با در نظر گرفتن موقعیت نقطه D دیده می‌شود که شکل پذیری فولاد جدید به شدت کاهش یافته است. به چنین عملیاتی که بر روی فولاد در دمای محیط و به منظور تغییر خواص مکانیکی فولاد انجام می‌گیرد، کار سرد می‌گویند.



شکل ۱-۱۱. کار سرد

ممکن است چنین به نظر برسد که افزایش مقاومت فولاد به قیمت از دست رفتن شکل پذیری فولاد و از بین رفتن نقطه کاملاً مشخص تنش تسلیم فولاد به پله خمیری فولاد حاصل می‌شود ولی حقیقت این است که پس از مدتی که بار نمونه حذف شد، فولاد جدید خواص مکانیکی دیگری را که آنرا نمی‌توان با نقاط C و D و E (شکل ۱-۱۲) نشان داد، از خود نشان می‌دهد. به پدیده‌ای که بر طبق آن یک چنین تغییر حالتی حاصل می‌شود کهنگی کرنش اطلاق می‌شود که بر طبق آن فولاد جدید تنش تسلیم بالاتری از خود نشان داده، بار دیگر دارای پله خمیری و ناحیه سختی مجدد کرنش (شکل ۱-۱۲) خواهد شد.



شکل ۱۲-۱. تأثیر کهنگی کرنش

## پرسشهای چهار گزینه ای

۱- با افزایش مقدار کربن در آلیاژ فولاد:

۱- جوش پذیری فولاد بهتر می شود.

۲- فولاد شکننده شده و مقاومت فشاری آن افزایش یافته و جوش پذیری آن کاهش می یابد.

۳- فولاد شکننده شده و تغییر شکل پذیری آن افزایش یافته و جوش پذیری آن کاهش می یابد.

۴- هیچ تأثیری در خواص فولاد به وجود نمی آید.

۲- برای فولاد نرمه ساختمانی بین حد ارتجاعی برش  $F_{ys}$  و حد ارتجاعی کششی  $F_y$  کدام

رابطه برقرار است؟

$$F_{ys} = \sqrt{\frac{2}{3}} F_y \quad ۲$$

$$F_{ys} = F_y \quad ۱$$

$$F_{ys} = \frac{1}{\sqrt{3}} F_y \quad ۴$$

۳-  $F_{ys}$  ربطی به  $F_y$  ندارد.

۳- نسبت پواسون برای فولاد در محدوده ارتجاعی بین کدام دو عدد قرار دارد؟

۱- ۰/۵ تا ۰/۶    ۲- ۰/۳۵ تا ۰/۴۳    ۳- ۰/۲۵ تا ۰/۳۳    ۴- ۰/۱۵ تا ۰/۲۳

۴- معایب استفاده از فولاد کدامها می باشند؟

۱- قیمت بالا

۲- قابلیت زنگ زدن آن بالاست

۳- برای محافظت در برابر زنگ زدن باید آنها را رنگ کرد یا ...

۴- همه موارد

۵- می نیم درصد افزایش طول فولاد نرم (تحت کشش تا زمان گسیختگی) چه مقدار

می باشد.

۱- ۱ درصد    ۲- ۲ درصد    ۳- ۵۰ درصد    ۴- ۲۳ درصد

۶- فولادهای ساختمانی عموماً حاوی ... درصد کربن هستند.

۱- ۰/۱۵ تا ۰/۲۹    ۲- ۰/۳ تا ۰/۵۹    ۳- ۰/۶ تا ۱/۷    ۴- کمتر از ۰/۱۵

۷- کدام عملکرد نمی تواند به راحتی روی فولاد نرم اعمال شود؟

۱- سوراخ کردن    ۲- برش    ۳- پانچ کردن    ۴- سخت گردانی



۸- خزش در فولاد ...

۱- اصلاً مشاهده نمی‌شود.

۲- در تنشهای پایین ملاحظه نمی‌شود و فقط در تنشهای بالا مشاهده می‌شود

۳- در دمای محیط ملاحظه نمی‌شود ولی اگر دمای فولاد بالاتر برود، مقدار خزش آن نیز قابل توجه خواهد شد.

۴- همیشه همانند بتن وجود دارد.

۹- شیب مماس بر یک نقطه روی نمودار تنش - کرنش بالاتر از محدوده ارتجاعی چیست؟

۱-  $\nu$ ، نسبت پواسون

۲-  $E_s$ ، ضریب کرنش - سختی

۳-  $\sigma_y$ ، تنش تسلیم

۴-  $\epsilon$ ، ضریب الاستیسیت

۱۰- کدامیک از عبارتهای زیر نادرست می‌باشد؟

۱- تمامی فولادها دارای پله خمیری مشخصی می‌باشند.

۲- ضریب ارتجاعی برش کمتر از نصف ضریب الاستیسیت فولاد می‌باشد.

۳- عضوی که تحت تنش سه محوری قرار دارد، نسبت به عضوی که تحت تنش تک محوری قرار دارد، ترد شکن تر است.

۴- حد خستگی، تنشی است که در تعداد دوره تناوب بیش از حدود دو میلیون باعث گسیختگی می‌شود.

۱۱- کدام جمله صحیح است؟

۱- اگر در یک میله فولادی تحت کشش، تنش بیش از تسلیم بشود، فولاد پله خمیری خود را از دست می‌دهد.

۲- کار سرد، موجب کاهش شکل پذیری فولاد می‌گردد.

۳- پدیده کهنگی کرنش موجب کاهش تنش گسیختگی می‌گردد.

۴- همه موارد

# مادسیج

شبکه آموزشی - پژوهشی ایران



## مادسیج، پنجره ای به یادگیری نوین

مادسیج مخفف کلمه madsage به معنای شیفته دانایی و در مفهوم بومی به معنای دهکده علم و دانش ایران می باشد. در این مفهوم اشاره به دو کلمه سیج (یکی از روستاهای زیبای کشورمان) و ماد (یکی از اولین اقوام ایران) می باشد.

شبکه آموزشی - پژوهشی مادسیج (IRESNET) با هدف بهبود پیشرفت علمی و دسترسی هرچه راحت تر جامعه بزرگ علمی ایران، در فضای مجازی ایجاد شده است. هسته اولیه مادسیج از طرح پایان نامه کارشناسی ارشد جناب آقای رضا محمودی دانش آموخته رشته مدیریت آموزشی دانشگاه تهران که با راهنمایی استاد گرانقدر جناب آقای دکتر عبادی معاون دانشگاه مجازی مهر البرز می باشد، بر گرفته شده است.

# IRan Education & Research NETWORK